

明 細 書

発明の名称 (Title of the Invention)

「金属間化合物による被覆方法」

発明の技術分野 (Field of the Invention)

本発明は、基材を金属間化合物で被覆又は接合するのに有用な被覆方法（又は接合方法）およびそのための被覆装置に関する。より具体的には、本発明は、例えば、航空機エンジンのタービンブレードの耐食被覆、自動車エンジンの排気弁の耐熱・耐摩耗被覆、ゴミ焼却炉の排気系統の耐食・耐酸化被覆などの他、これら部品を補修するための肉盛り溶接などに応用できる技術に関する。

発明の技術的背景 (Background of the Invention)

次世代の自動車、船舶、航空宇宙機器等の輸送機関あるいはエネルギープラントの熱機関などに用いる構造材料として、軽く耐熱性に優れた材料の開発が不可欠である。高強度耐熱材料として期待されるアルミナイド系などの金属間化合物はこのような条件に適合する素材であり、組成、組織の最適化、高性能化や所望の構造体を得るための加工方法など実用化に向けた研究が各国で行われている。

金属材料表面に耐食性や耐摩耗性を付与する目的で金属間化合物の被覆が行われるが、金属間化合物による被覆を簡便に得る原理および方法は未だ確立されていない。金属間化合物を得るための方法として、拡散法、溶射法、燃焼合成法がある。

拡散法は、基材金属と反応して金属間化合物を生成し得る別種の金属を、基材表面に蒸着などにより適用した後、高温に加熱保持し、基材表面に反応層を形成する方法である。拡散法では、拡散という超低速の物質移動現象を利用するため、反応層の皮膜厚さの制御が容易であるという長所がある反面、被覆の形成に要す

る時間が数時間から数十時間と極めて長いという短所がある。そのため、達成できる被覆厚さは数10 μm 以下と薄いものに限られる。また、高温で処理するため、基材に与える影響も無視できない。

溶射法は、例えば、特開2000-96206号公報に示されるように、特定の元素を含む合金層を基材に減圧プラズマ溶射により堆積した上に、さらにアルミニウムを溶射しアルミニウムの発熱を伴う冶金的反応によって金属間化合物の被覆層を形成する方法である。この方法は、直接的に金属間化合物を高温で溶解する方法に比較して、相対的に低い温度と短い時間で発熱反応を引き起こすことができるので、多大のエネルギーを消費しなくてもよい利点があるが、プラズマ、電気アーク、レーザなどの大型の熱源を必要とする。元来、溶射法では、被覆層と基材の密着性や、溶射時の雰囲気ガスの巻き込みにより被覆内に気孔を発生しやすいという問題がある。また、前記の方法で形成される被覆層の厚さは、溶射の施工性・経済性などの理由から、合金層とアルミニウム層を併せても数10 μm から数100 μm 程度であり、形成される被覆の不均質・脆弱化などにより亀裂や局部剥離を生じる懸念がある。

次に、燃焼合成法 (Self-Propagating High Temperature Synthesis もしくは Combustion Synthesis) は、高い反応熱を伴って化合物の生成反応が短時間に自発的に進行するプロセスであり、高融点セラミックスや金属間化合物が容易に合成できることが特徴であり、燃焼合成法の原理が1967年旧ソ連のメルジャーノフ等によって発見されて以来、理論的研究と応用への開発が進められている(日本金属学会会報, 第32巻, 第12号, 845頁)。燃焼合成法は、金属間化合物を構成する異種金属同士の混合圧粉体を基材表面に置き、加圧下で加熱することにより燃焼合成反応を起こして金属間化合物を生成するとともに金属間化合物を基材に接合する方法である。燃焼合成法では自己発熱反応を利用するため、被覆層の合成と同時に基材への接合を短時間で行えるという長所を備えている。しかし、合成時の発熱と基材への伝熱のバランスから数ミリ以上という厚い被覆に限られる。

さらに、NiAlやTiAlなどの金属間化合物は、800℃～1000℃で使用でき、高温材料として優れた特性を有している。そのため、エンジン部品や

宇宙航空機機体部品などへの応用開発が行われているが、優れた特性がありながら成形加工に必要な延性が得られず実用化が阻まれている。金属間化合物は、単位モル当たり100kJ前後の高い生成エネルギーを有しており、化合時に1500℃～2000℃の高い発熱反応を伴うことにより自発的に合成反応が進行する。そのため、高温での外部過熱を必要としない省エネルギープロセスであるが、反応伝播、温度、組織の制御が難しく、耐熱性が必要な部品の実用化への課題は多く残されている。例えば、従来の燃焼合成法では、異種金属を混合して圧粉体として用いるので、異種金属がともに同じ温度に加熱される。それゆえ、一方の金属の溶融温度が自動的に反応開始温度となり、反応開始温度、ひいては反応による発熱温度、基材の溶融深さを制御することができず、被覆層が薄い場合には、接合強度を向上できない場合がある。

このように、金属間化合物による基材の被覆は、拡散法、溶射法、燃焼合成法などにより形成されるが、極めて加工が困難であるという材質の有する特性から、多くの工程とエネルギーを消費している。そのため、少ない消費エネルギーで短時間内に、低コストで被覆部材（例えば、肉盛り溶接部材）を得ることができない。

従って、本発明の目的は、基材を金属間化合物で簡便かつ効率よく被覆できるとともに、複数の基材を溶接して接合できる方法およびそのための被覆装置を提供することにある。

本発明の他の目的は、数百μmから数mm厚さを有する金属間化合物の被覆層を少ない消費エネルギーで短時間に形成できる方法およびそのための被覆装置を提供することにある。

本発明のさらに他の目的は、反応開始温度を容易に制御でき、被覆層の厚みの如何にかかわらず、基材と被覆層との接合強度を向上できる方法およびそのための被覆装置を提供することにある。

本発明の別の目的は、前工程（拡散法における蒸着、溶射法における前駆層の堆積工程、燃焼合成法における圧粉体作製など）が不要であるだけでなく、さらにコンピュータで微細に制御できる制御システム（CAD/CAMシステムなど）の利用により、金属間化合物による基材表面の被覆を自在かつ自動的に行うことができる方法を提供することにある。

本発明のさらに別の目的は、比較的、小容量の熱源（高周波加熱機や抵抗加熱機など）が使用でき、エネルギー的に有利に金属間化合物の被覆層を形成できる方法を提供することにある。

発明の概要 (Summary of the Invention)

本発明者らは、基材上に第1の物質を堆積させ、この第1の物質上に第2の物質を吐出させて反応させると、基材と生成した金属間化合物が融合一体化し、基材上に金属間化合物の被覆層を形成できることを見出し、本発明を完成した。

すなわち、本発明の方法は、基材上に金属間化合物の被覆層を形成する方法であって、基材上に第1の物質を堆積する工程と、第2の物質を第1の物質上に吐出する工程を含み、第1の物質と第2の物質とを反応させることにより、基材上に金属間化合物の被覆層を形成する。本発明の方法は、複数の基材を金属間化合物で溶接する方法としても有用である。すなわち、基材上に第1の物質を堆積する工程と、第2の物質を第1の物質上に吐出する工程を含み、第1の物質と第2の物質を反応させながら溶接被覆することにより、複数の基材を接合することもできる。これらの方法において、被覆層は、基材と融合して基材の表面に肉盛り被覆層として形成してもよい。

本発明の方法において、前記第1の物質は、例えば、ニッケル、コバルト、鉄、ニオブ、バナジウム、モリブデン、タングステン、クロムおよびタンタルから選択された少なくとも一種の金属で構成でき、第2の物質は、例えば、アルミニウムおよびチタンから選択された少なくとも一種の金属で構成できる。基材を構成する物質は、種々の金属、例えば、鉄、ニッケル、コバルト、アルミニウムおよびニオブから選択された少なくとも一種で構成された金属又は合金であってもよい。さらに、基材と被覆層との接合強度を高めるため、基材を構成する物質は、第1の物質および第2の物質から選択された少なくとも一種の金属、又は類似の金属で構成してもよい。

本発明の方法は、種々の態様、例えば、第1の物質を、粉末状の形態又は熔融状態で基材上に堆積させ、堆積した第1の物質上に、第2の物質を、熔融状態又

は粉末状の形態で吐出させることにより行うことができる。この方法において、第1の物質および第2の物質のうち少なくとも一方の物質を熔融状態で用いる。

前記第1の物質はセラミックスを含有していてもよい。より具体的には、粉末状又は熔融状態の第1の物質は、アルミニウム、イットリウム、チタン、ジルコニウム、ハフニウムおよび珪素から選択された少なくとも一種の金属の酸化物、炭化物、窒化物又は硼化物で構成された粉末状又は繊維状セラミックスを含有していてもよい。本発明では、前記第1の物質と第2の物質との反応を利用して、金属間化合物、セラミックス分散型金属間化合物、又は窒化物含有金属間化合物で構成された被覆層を形成できる。

また、本発明には、基材上に堆積した第1の物質上に、第2の物質を吐出して金属間化合物層を形成する工程と、この金属間化合物層上に第1の物質を堆積させ、堆積した第1の物質上に第2の物質を吐出して金属間化合物層を積層する工程とを経ることにより、コンピュータ制御システムを利用して3次元的造形物(又は3次元モデル、3次元形状物)を作製する方法も含まれる。

さらに、本発明の被覆装置は、第1の物質と第2の物質との反応により、基材上に金属間化合物の被覆層を形成するための装置であって、第1の物質を基材上に堆積させるためのユニットと、第2の物質を第1の物質上に吐出させるためのユニットと、第1の物質および第2の物質のうち少なくとも一方の物質を熔融させるためのユニットとを備えている。

本発明では、材料自体の発熱反応を有効に利用するので、組成、組織を最適化した金属間化合物の生成に加えて、金属間化合物による被覆層(特に、高融点の緻密な溶接被覆層や肉盛り溶接被覆層)を数百 μm ～数 mm 域の厚さで燃焼合成しつつ連続的に形成し、既存の工法では困難な緻密な肉盛り溶接被覆を少ない消費エネルギーで短時間に形成できる。すなわち、本発明では、例えば、 NiAl や TiAl 等の金属間化合物が有する高い生成熱を応用し、高温強度や耐食性を有するが加工が困難な金属間化合物の肉盛り被覆を実用的に施工する装置と、金属間化合物による被覆の生成プロセスを提供できる。材料的見地からすれば、加工が極めて困難な金属間化合物による高機能部材を経済的に提供することが可能となる。

本発明の方法によれば、少ない消費エネルギーと短時間で被覆を形成できる利点があり、従来の加工法や冶金的手法における煩雑な工程を短縮し、最終製品となる高温耐熱強度に優れた高性能部品を低コストに製作し得る。

図面の簡単な説明 (Brief Description of the Drawings)

図1は肉盛り溶接部と基材の接合界面における元素濃度分布図である。

図2は本発明の装置の概念図である。

図3は本発明の装置の一例を示す概略図である。

図4は本発明の被覆方法および被覆装置の他の例を示す概略図である。

図5は、被覆装置と基材上に形成された被覆層（肉盛り溶接部）との配置関係を示す概略図である。

図6は図5の溶接部を示す平面図である。

- 1…被覆又は溶接装置
- 2…基材
- 3…熔融アルミニウム液滴
- 10…溶接台
- 11…共通台
- 12…熱源
- 13…温度検知器
- 14…昇降駆動装置
- 20…吐出ユニット（材料単位吐出部）
- 21…吐出用ノズル
- 22…高周波加熱器
- 23…坩堝
- 24…アルミニウム片
- 25…熱源
- 26…温度検知器
- 27…圧電セラミックス（圧電素子）

- 3 0…堆積ユニット（材料単位堆積部）
- 3 1…ニッケル粉末
- 3 2…堆積用ノズル
- 3 3…加振機構
- 3 4…篩
- 4 0…真空
- 5 0…ガス体
- 5 1…ガス供給装置
- 6 0…容器（チャンバ）
- 6 4…温度検知器
- 7 0…制御ユニット
- 8 0…粉末堆積層
- 8 1…反応生成部（NiAl 要素片）
- 8 2…基材との界面接合部
- 8 3…余剰ニッケル粉末
- 8 4…第 1 の被覆層（肉盛り溶接層）
- 8 5…第 2 の被覆層（肉盛り溶接層）
- 9 0…基材
- 9 1…第 1 の基材
- 9 2…第 2 の基材
- 9 3…被覆層（肉盛り溶接部）
- 9 4…ニッケル粉末堆積層

発明の具体的な説明 (Detailed description of Preferred Embodiment)

本発明の方法では、第 1 の物質の堆積と第 2 の物質の吐出という簡単な方法で、基材上に金属間化合物の被覆層を効率よく形成できる。なお、「金属間化合物」とは、周知のように、複数の金属元素が結合し、成分の金属元素とは異なる新たな性質を有する化合物を意味する。また、「被覆層」を「肉盛り被覆層」、「肉

盛り溶接部」などという場合がある。

第1の物質及び第2の物質を構成する金属元素としては、金属間化合物を形成できる限り特に制限されず、例えば、周期表第2 A族金属（マグネシウム、カルシウム、バリウムなど）、周期表3 A族金属（スカンジウム、イットリウムなど）、周期表4 A族金属（チタン、ジルコニウムなど）、周期表5 A族金属（バナジウム、ニオブ、タンタルなど）、周期表6 A族金属（クロム、モリブデン、タングステンなど）、周期表7 A族金属（マンガンなど）、周期表8族金属（鉄、コバルト、ニッケル、イリジウム、パラジウム、白金など）、周期表1 B族金属（銅、銀、金）、周期表2 B族金属（亜鉛など）、周期表3 B族金属（アルミニウム、ガリウム、インジウムなど）、周期表4 B族金属（ケイ素、ゲルマニウム、スズ、鉛など）などが例示できる。金属間化合物は、用途に応じて、異なる周期表の金属元素で構成された第1の物質と第2の物質とを適当に組み合わせて形成でき、複数の金属元素の組合せは特に制限されない。

第1の物質及び／又は第2の物質を構成する金属元素は、単独で使用してもよく、二種以上組み合わせて混合物や合金などの形態で使用してもよい。

第1の物質及び第2の物質は、所望する金属間化合物の特性（例えば、耐熱性、耐久性、耐環境性、摺動性など）に応じて、前記金属から適当に選択できる。例えば、金属間化合物は、周期表4 A族金属（チタン、ジルコニウムなど）、周期表5 A族金属（バナジウム、ニオブ、タンタルなど）、周期表6 A族金属（クロム、モリブデン、タングステンなど）、周期表8族金属（鉄、コバルト、ニッケルなど）、周期表3 B族金属（アルミニウム、ガリウム、インジウムなど）、周期表4 B族金属（ケイ素、ゲルマニウム、スズなど）から選択され、かつ周期表の異なる複数の金属元素を組み合わせて形成できる。より具体的には、高温構造材料としての特性を向上させる場合、第1の物質としては、例えば、周期表8族元素（ニッケル、コバルト、鉄など）、周期表5 A族元素（ニオブ、バナジウム、タンタルなど）、周期表6 A族元素（モリブデン、タングステン、クロム）などが例示でき、第2の物質としては、例えば、周期表8族金属（鉄、コバルト、ニッケルなど）周期表4 A族金属（チタンなど）などが例示できる。

基材は、セラミックス基材などであってもよいが、通常、金属基材である。基

第1の物質は、被覆層を補強するため、セラミックスを含有していてもよい。セラミックスは、通常、第1の物質と第2の物質との反応温度よりも高い融点を有している。セラミックスの構成成分は、アルミニウム、イットリウム、チタン、ジルコニウム、ハフニウム、珪素、マグネシウム、タングステン、タリウム、バナジウム、ニオブなどの金属と、酸素、炭素、窒素及びホウ素などから選択された少なくとも一種の非金属とである場合が多く、非金属同士のセラミックス（例えば、炭素とホウ素、窒素とホウ素など）であってもよい。金属成分は、通常、アルミニウム、イットリウム、チタン、ジルコニウム、ハフニウム、珪素などから選択された少なくとも一種の金属で構成できる。セラミックスは、酸化物系セラミックス（アルミナ、ジルコニア、マグネシア、イットリア、ムライト、チタン酸バリウムなど）、非酸化物系セラミックスのいずれであってもよい。非酸化物系セラミックスとしては、炭化物（炭化ケイ素、炭化ホウ素、炭化チタン、炭化ハフニウム、炭化ジルコニウム、炭化タングステン、炭化バナジウム、炭化ニオブなど）、窒化物（窒化ケイ素、窒化ホウ素、窒化アルミニウム、窒化チタン、窒化ハフニウム、窒化ジルコニウム、窒化タリウム、窒化バナジウム、窒化ニオブなど）、硼化物（ホウ化チタン、ホウ化ジルコニウム、ホウ化ハフニウム、ホウ化ニオブなど）などが例示できる。これらのセラミックスは単独で又は二種以上組み合わせて使用できる。

セラミックスは、粉末状（例えば、平均粒子径0.1～20 μ m、好ましくは0.5～10 μ m程度の粉末）又は繊維状（例えば、平均繊維径0.1～20 μ m）の状態で用いられる。

m、好ましくは $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 程度、平均繊維長 $10 \sim 10000 \mu\text{m}$ 、好ましくは $50 \sim 3000 \mu\text{m}$ 程度の繊維)の形態で使用でき、繊維状セラミックスはウィスカーであってもよい。

セラミックスの割合は、通常、第1の物質100重量部に対して0.1~100重量部、好ましくは1~50重量部程度の範囲から選択できる。セラミックスの含有形態は、第1の物質とセラミックスとの混合形態であってもよく、第1の物質層とセラミックス層との堆積形態などであってもよい。

なお、必要であれば、第1の物質とともに、補強繊維として炭素繊維を用いてもよい。

堆積工程では、第1の物質を、粉末状の形態又は熔融状態で基材上に堆積(又は適用)し、基材上に第1の物質層を形成する。そして、吐出する工程で、堆積した第1の物質上に、第2の物質を、熔融状態又は粉末状の形態で吐出(又は適用)させることにより、第1の物質と第2の物質とを反応させ、基材上に金属間化合物の被覆層を形成できる。なお、第1の物質および第2の物質のうち少なくとも一方の物質は熔融状態で用いる必要がある。すなわち、本発明の方法では、

(1) 第1の物質を、粉末状の形態で基材上に堆積させ、堆積した第1の物質上に、第2の物質を熔融状態で吐出させる方法、(2) 第1の物質を熔融状態とした液相金属の形態で基材上に堆積させ、堆積した第1の物質上に、第2の物質を粉末状の形態で吐出させる方法、および(3) 熔融状態で堆積した第1の物質上に、第2の物質を熔融状態で吐出させる方法により、基材上に金属間化合物の被覆層を形成できる。

なお、粉末状の形態で第1の物質又は第2の物質を用いる場合、粉末の平均粒子径は、通常、 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 、好ましくは $1 \sim 70 \mu\text{m}$ 、特に $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 程度である。第1の物質の堆積は、慣用の堆積(散布又は排出)ユニットを用いて行うことができる。第1の物質、第2の物質を熔融状態で用いる場合、各物質は、線状、カーテン状の形態で吐出させることも可能であるが、第2の物質は、通常、滴下装置などの吐出ユニットを用いて、液滴の形態で吐出させることができる。なお、堆積した第1の物質に対する第2の物質の吐出量は、金属間化合物の金属組成比に応じて選択できる。

本発明の方法では、第1の物質及び第2の物質の圧粉体を加熱して燃焼合成する方法と異なり、第1の物質上に第2の物質を適用し、第1の物質と第2の物質との自己発熱反応を利用して金属間化合物を生成させるため、各物質の温度を独立して調整し、反応開始温度を容易かつ自由にコントロールできるという利点がある。第1の物質及び第2の物質の溶融温度は、金属の種類、金属間化合物の組成割合などに応じて、例えば、500～1500℃（好ましくは800～1500℃）程度の範囲から選択できる。

第1の物質と第2の物質との反応は、真空を含めた種々の雰囲気下で行うことができるが、通常、不活性ガス雰囲気又は反応性ガス雰囲気で行われる。不活性ガスとしては、ヘリウム、アルゴンガスなどが挙げられる。反応性ガスとしては、例えば、窒素、二酸化炭素、酸素含有ガス（空気など）などが挙げられる。反応性ガスの雰囲気下で反応させると、第1の物質及び／又は第2の物質と反応性ガスとの反応生成物（例えば、窒化物）を含有する金属間化合物を生成できる。なお、前記セラミックスを含む第1の物質を用いると、セラミックス分散型金属間化合物で構成された被覆層を形成できる。

本発明の方法では、第1の物質と第2の物質との反応による高い生成熱を利用できるので、基材の融合により、基材と金属間化合物の被覆層とを高い密着力で一体化できる。そのため、本発明の方法は、基材の被覆方法又は基材の表面改質方法として有用である。

また、本発明の方法は、複数の基材を金属間化合物で接合する方法（溶接方法）としても有用である。すなわち、複数の基材の隣接域に第1の物質を堆積し、第2の物質を第1の物質上に吐出すると、高い反応熱により金属間化合物が生成するので、隣接する金属基材を金属間化合物により溶接して接合できる。この方法では、同種の基材だけでなく異種の基材をも溶接できる。すなわち、基材の種類が異なっても、第1の物質及び第2の物質として、金属間化合物を生成し、かつ各基材の構成成分と共通又は類似する金属成分を選択すると、複数の基材を確実かつ強固に接合できる。

さらに、本発明の方法は、第1の物質の堆積および第2の物質の吐出により、基材の表面に肉盛り被覆層（特に基材と融合した肉盛り被覆層）を形成したり、

複数の基材を肉盛り溶接するために有用である。また、肉盛り被覆により、基材の強度や耐蝕性などを補強し、損傷した基材を修復又は補修できるため、基材の修復方法又は補修方法としても有用である。

なお、前記肉盛り被覆又は溶接などによる被覆層の形成においては、第1の物質に対して第2の物質を連続的又は間欠的に適用することにより、連続した溶接パス（溶接ビードの軌跡）を生成させることもできる。

金属間化合物で構成された被覆層の厚みは、広い範囲、例えば、数ミクロン（例えば、 $10\mu\text{m}$ ）～数mm（例えば、 5mm ）程度の範囲から選択できる。すなわち、本発明では、第1の物質及び第2の物質の適用量などを調整することにより、数ミクロン（例えば、 $10\mu\text{m}$ ）～数百 μm （例えば、 $500\mu\text{m}$ ）程度の薄い被覆層や、厚み $0.1\sim 1\text{mm}$ 程度の被覆層も形成できる。さらに、本発明では、厚みが数百 μm （例えば、 $200\mu\text{m}$ ）～数mm（例えば、 5mm ）程度の金属間化合物の被覆層を、少ない消費エネルギーで短時間に形成できるという利点がある。

さらに、被覆層（金属間化合物層）の上に第1の物質の堆積層を形成し、この堆積層に第2の物質を吐出する操作（肉盛り被覆操作）を繰り返すことにより、肉盛り被覆層を積層し、3次元的に造形することもできる。

以下に、ニッケル／アルミニウムを用いた具体的な方法に基づいて、本発明をより詳細に説明する。

金属基材表面に、例えば、ニッケル粉末を供給した後、アルミニウム系金属（純アルミニウム又はその合金など）の熔融金属の液滴を供給すると、両金属は接触と同時に激しい発熱反応を起こし、ニッケル－アルミニウム系金属間化合物が生成するとともに反応熱により金属基材に接合する。その結果、金属間化合物の肉盛り溶接ができる。

例えば、平均粒子径が $5\mu\text{m}$ のニッケル粉末を、直径が約 10mm 及び高さが約 6mm の基材上に堆積させ、この堆積層の上に、ニッケル粉末と等しいモル比率のアルミニウム液滴（液滴の温度を $1000^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ まで変化させる）を落下させ、両者の常温での反応挙動と反応生成物の性状を観察すると、アルミニウム液滴のいずれの温度においても、アルミニウム液滴とニッケル粉末の堆積

層は燃焼合成反応を生じ、粒状の金属間化合物を生成する。このような系において、組成の均一性および気孔の残存性は、アルミニウム液滴の温度に依存する。例えば、アルミニウム液滴温度が 1100°C 以上であると、ニッケルとアルミニウムとが等しいモル比率の金属間化合物 NiAl を生成するが、アルミニウム液滴の温度が 1000°C の場合には、 NiAl 以外に Ni_3Al や NiAl_3 などの金属間化合物も部分的に生成し反応は不完全となる。このような不完全反応の生成物であっても、 1200°C で2時間以上保持することにより、 NiAl の単相の化合物を生成できる。

一方、生成物の気孔残存性に着目すると、アルミニウム液滴の温度が 1100°C であるとき、生成物は NiAl 単相であるが、その密度は NiAl の理論密度に対して65%であり、体積分率35%の気孔を含んでいる。アルミニウム液滴温度が 1200°C のときは生成物の密度はほぼ理論密度と等しく気孔の残存は無視できる程度である。

また、基材上に形成した反応生成物（被覆層）の横位置（被覆層と隣接する基材の部位）に新たなニッケル粉末を堆積させ、この堆積層にアルミニウムの液滴を落下させる方法により、隣接領域での被覆層（反応生成物）同士の接合について検討した。さらに、隣接した被覆層（反応生成物接合体）の上に新たにニッケル粉末を堆積させ、この堆積層にアルミニウム液滴を落下させる方法により、被覆層（反応生成物接合体）同士の積み上げ接合について検討した。その結果、アルミニウム液滴の温度を 1200°C に固定して反応生成物同士の接合を観察すると、隣接方向の接合、および接合体同士の上下方向のいずれもが接合する。

また、アルゴンガス雰囲気中で、厚さ2mmの円盤状SUS316ステンレス鋼の上に平均粒子径約45ミクロンのニッケル粉末1.6g (0.027mol)を置き、そこにアルミニウム液滴0.7g (0.027mol)を落下させた場合、反応温度について、ステンレス鋼板およびニッケル粉末を 330°C 、アルミニウム液滴を 1200°C としたとき、両金属は接触と同時に激しい発熱反応を起こして熔融 NiAl を生成し、ステンレス鋼上で直ちに凝固した。冷却後に試料を観察すると、溶接ビード状の NiAl が形成され、ステンレス鋼と接合していた。接合界面を横切る断面について組織観察を行うとともにEPMA (Electron

probe microanalyzer) 分析を行った結果、NiAlが合成されときの激しい発熱によりステンレス鋼は約100 μ mの深さまで溶融し、図1に示す肉盛り溶接層とステンレス鋼板基材との接合界面を横切る元素の濃度分布からわかるように、接合の界面近傍では化学量論組成からややずれてはいるものの、肉盛り部全体にわたりNiAlの同溶限内の組成を持つ化合物が生成している。図1において、左側の縦軸は元素の濃度を示し、右側の縦軸に元素名を付記している。横軸は肉盛り被覆表面からの距離を示す。

すなわち、本方法によれば、ニッケル粉末とアルミニウム液滴からNiAlが合成でき、同時に基材のステンレス鋼板に被覆層(肉盛り溶接層)を形成できる。さらに、ニッケル粉末の堆積と溶融アルミニウム液滴の滴下は、制御装置(計算機制御)により制御可能である。そのため、溶融アルミニウム液滴を、基材上に堆積したニッケル粉末層に滴下し、溶融アルミニウム滴下によるNiAl要素の合成と隣接するNiAl要素同士の接合を行うことにより、2次元的なNiAl被覆層を形成できる。また、既に形成されているNiAl層にニッケル粉末層を堆積後、溶融アルミニウムを滴下し、下層のNiAl要素上でNiAl要素の合成と隣接するNiAl要素同士の接合を行いながら、下層のNiAl要素同士とも接合又は積層し、被覆層を盛り上げて厚くすることもできる。

ニッケル粉末の代わりにチタン粉末を堆積すれば、TiAl系金属間化合物の被覆層が形成できる。また、ニッケル粉末に、セラミックス粉末やセラミックス繊維を混合し、複合化することも可能である。そのため、本発明の方法は、さまざまな展開、例えば、金属粉末にセラミックス(TiB₂やAl₂O₃粉末など)を適量混合することにより、セラミックスを複合化することが可能であり、さらに、堆積する粉末の組成を肉盛の進行に応じて(すなわち厚み方向に)変えていくことにより、傾斜組成を有する被覆の施工が可能になるなどの種々の展開を図ることができる。

なお、ニッケル粉末やチタン粉末以外にも、コバルト、鉄、ニオブなどの純金属粉末、合金粉末、又はこれらの混合粉末、さらにはこれらの金属成分にセラミックスの粒子や繊維などの添加物を混合した混合物を使用できる。また、金属基材には、鉄基合金、ニッケル基合金、コバルト基合金、アルミニウム基合金、ニオ

ブ基合金などの他、肉盛りする金属間化合物と同種又は類似の金属（周期表が共通する金属など）などが使用できる。

アルミニウム液滴とニッケル金属粉末との反応制御に関しては、Al-Ni、Al-Ti系では、NiAl、Ni₃Al、Al₃Ni₂、TiAl、TiAl₃など多くの化合物相が存在し、滴下したアルミニウム液滴とこれら金属との反応では、必ずしも目的とする化合物相のみが合成されとは限らない。また、反応域や、生成相の密度、組織制御も被覆特性や溶接特性の重要な因子となる。これらの制御においては、アルミニウム液滴や基材の温度、液滴サイズ、滴下速度、金属粉末の粒子径との関係を最適化することにより、反応制御することができる。

被覆層の特性に関しては、被覆部の位置精度、密度、気孔率、組織、強度、靱性、熱応力、耐熱性、耐食性、耐摩耗性等を最適化および制御することができる。このため、基材と共に、被覆層に、熱処理、HIP処理、表面コーティング処理などの種々の処理を施すことも可能である。また、必要に応じて仕上げ加工を追加して行うこともできる。これらの処理により、亀裂や破損、応力集中などを生じない高品質の被覆又は溶接を可能としてもよい。

本発明の方法を実際に実施し構成するための要素として、アルミニウム融液の吐出機構（又はアルミニウム液滴の滴下機構）、金属粉末の堆積機構、溶融アルミニウムと金属粉末層の反応域制御、反応相制御、金属間化合物の被覆層の気孔率および組織制御、システム化などがある。以下に主たる要素の詳細を述べる。なお、前記のように、以下に述べる「金属粉末」または「粉末」とは金属に限るものではなく、金属粉末とセラミックス粉末の混合体やセラミックス粉末であってもよい。

金属粉末の堆積機構は、粉末を基材上に堆積させるための堆積ユニットを基台や溶接台上で移動させながら、堆積ユニットから適量の金属粉末を基台又は溶接台上に供給した後、元の位置に復帰するか、又は基台又は溶接台の周辺部に退避させる機構である。

アルミニウム融液の吐出又は滴下機構は、不活性ガス（アルゴンガスなど）を充满した溶融アルミニウムポットに、圧電素子によりダイヤフラムを介して振動予圧を作用させ、あるいはパルスバルブにより不活性ガス（アルゴンガスなど）

に圧力を印加し、ノズルよりアルミニウム融液又は液滴を連続的又は不連続的(間欠的)に吐出又は滴下する機構であり、液滴のサイズ、温度、滴下速度などを制御できる。

装置全体の制御は、形状又はパターンの数値化データに基づくアルミニウム液滴の吐出又は滴下と、対応する溶接台の移動、金属粉末の堆積などに関する一連の動作を、アルゴンガスの雰囲気で行うための制御システム(計算機等による制御)により行うことができる。なお、プロセスの雰囲気はアルゴンガスに限るものではなく、窒化物の反応生成を目的として窒素などの反応性ガス体を容器(又はチャンバ)内に充填してもよく、不純物の介在又は混入を避けるため容器内を真空としてもよい。そして、前記の諸要素を統合することにより、装置全体として、金属間化合物を対象とする被覆システム又は反応性肉盛り溶接システムを構成できる。

上記より明らかなように、本発明の被覆装置又は溶接装置は、第1の物質を基材上に堆積させるためのユニットと、第2の物質を第1の物質上に吐出させるためのユニットと、第1の物質および第2の物質のうち少なくとも一方の物質を溶融させるためのユニットとを備えていればよい。さらに、装置は、通常、前記基材を載置又は保持可能な基台又は溶接台を備えている。

このような装置において、堆積ユニットと吐出ユニットは、基材の形状に応じて、少なくともX軸及び/又はY軸方向に相対的に移動可能であり、Z軸方向に移動可能であってもよい。また、前記基台又は溶接台は、堆積ユニット及び吐出ユニットに対して、少なくともZ軸方向に相対的に移動可能であってもよく、さらにX軸及び/又はY軸方向に相対的に移動可能であってもよい。さらには、基台又は溶接台は、基材の立体形状に応じて、基材を回転可能に保持してもよい。例えば、表面に曲率を有する立体的又は3次元形状の基材(例えば、タービンブレードなど)を3次元的に被覆する場合、X軸方向及び/又はY軸方向に加えて、Z軸方向へのビードの軌跡が必要となる。このことは、肉盛り被覆や溶接においても同様である。そのため、3次元的に被覆(肉盛り被覆や肉盛り溶接を含む)する場合、堆積ユニットと吐出ユニットは、基材に対して、X軸及び/又はY軸方向に加えて、Z軸方向にも相対的に移動可能であるのが有利である。この

ような方法を利用すると、立体的又は３次元形状の基材（例えば、タービンブレードなど）の表面に、金属間化合物で形成された３次元構造物（例えば、貝殻構造の構造物）が形成できるので、コンピュータ制御システムを利用して３次元造形物（又は３次元モデル、３次元形状物）の作製に利用できる。

以下に、NiAlによる肉盛り溶接のプロセスを例にとって、本発明の装置および方法を、図２乃至図６に基づいて説明する。図２は本発明の装置の概念図であり、図３は本発明の装置の一例を示す概略図である。

被覆又は溶接装置１は、基材２を載置可能であり、かつＺ軸方向に移動可能な溶接台（又は基台）１０と、この溶接台の上でＸ軸及び／又はＹ軸方向の任意の位置に移動可能であり、かつ熔融アルミニウムを吐出可能な吐出ユニット（又は材料単位吐出部）２０と、前記溶接台１０の上でＸ軸またはＹ軸方向のいずれかの方向に移動可能であり、かつ前記基材２上に粉末状ニッケルを堆積可能な堆積ユニット（材料単位堆積部）３０とで構成される。

図３に示すように、前記装置１は、内部が、真空４０の状態、あるいはガス（アルゴンなどの不活性ガスまたは窒素などの反応性ガス体５０）雰囲気容器（又はチャンバ）６０により気密に囲われている。この容器６０内には、容器６０内部を加熱するための加熱手段（高周波熱源など）６１と、前記容器６０内部を排気して真空４０を生成するための減圧手段（ポンプ等）の駆動源６２またはガス体５０を循環させるためのガス循環手段（ブロワなど）の駆動源６３が設けられている。前記容器６０内部の雰囲気の温度は、温度検知器６４で計測される。

前記装置１には、溶接台１０と吐出ユニット２０と堆積ユニット３０とを備えた容器（チャンバ）６０を支持するための共通台１１が設けられている。前記溶接台１０の内部または下部には、堆積する粉末層（堆積層）の温度を調節するための加熱手段（ヒータ等の熱源１２）が設けられており、溶接台１０の温度は温度検知器１３で検出される。溶接台１０は、昇降機構を備えた駆動装置１４により容器（チャンバ）６０内で昇降可能である。さらに、装置１の外側には、不活性ガス又は反応性ガス体５０を容器（チャンバ）６０内に供給するためのガス供給装置５１が設けられている。

吐出ユニット２０は、熔融金属の液相滴下装置として機能し、吐出用ノズル２

1と、このノズル21の上部に配設された坩堝（又は融液ポット）23とを備えており、この坩堝（又は融液ポット）23は、アルミニウム片24を溶融した状態で保持する。さらに、吐出ユニット20は、坩堝（又は融液ポット）23内の溶融したアルミニウムをノズル21から液滴として吐出させるための圧電素子（圧電セラミックス27など）を備えている。前記ノズル21の周囲には、加熱手段（高周波加熱器又は抵抗加熱器22）がノズル21を囲って配設されているとともに、坩堝（又は融液ポット）23の溶融金属温度を調節するため、吐出ユニット21の内部又は外側には加熱手段（熱源25）が配設されている。吐出ユニット20の吐出部の温度は、温度検知器26で検出可能である。なお、前記ノズル21の先端開口の形状は特に制限されず円形状でも細長いスリット状であってもよい。吐出ユニット20からの溶融金属の吐出において、溶融金属の液滴3を幅広く吐出することにより、被覆又は溶接の施工効率を高めることができる。

粉末供給装置として機能する堆積ユニット30は、内部にニッケル粉末31を収容し、堆積ユニット30の先端にはノズル32が形成されている。このノズル32の上部には、振動を発生させるための加振機構33と、ニッケル粉末を適宜に落下供給するための篩34とが設けられており、加振機33で篩34を振動させながら、ニッケル粉末の堆積ユニット30を溶接台10上で掃引するように移動させることにより、ニッケル粉末31を数百 μm の厚さで均一に溶接台10上に供給し、粉末堆積層80を形成できる。前記ノズル32の先端開口の形状は特に制限されず円形状でも細長いスリット状であってもよい。また、ニッケル粉末の散布においては、ニッケル粉末31を幅広く散布することにより堆積層80を短時間内に形成できる。なお、ノズルのスリットの幅を調整可能な可変機構を設けると、ニッケル粉末31の供給量を動的に可変とすることも可能である。

吐出ユニット20において、アルミニウム片24は加熱手段（高周波加熱器又は抵抗加熱器22）により加熱溶融され、圧電セラミックス27の振動圧により融液ポット23からノズル21を経て、液滴（例えば、数百 μm 径の液滴）3として吐出される。溶接台10の基材2上に予め形成されたニッケル粉末の堆積層80には、溶融アルミニウムの液滴3が滴下し、燃焼合成反応により微小なNiAl要素片（反応生成部）81を形成する。そのため、所望の対象物の設計形状

(パターン) に沿って吐出ユニット 20 を X 軸及び／又は Y 軸方向に移動しながら、連続的又は不連続的に溶融金属 3 を滴下することにより、界面接合部 82 を介して、基材 2 上の同一平面内で、集合又は一体化した NiAl 要素片 (反応生成部) 81 により金属間化合物の第 1 の被覆層 (又は肉盛り溶接層、金属間化合物層) 84 を形成できる。

さらに被覆層の厚み (溶接の肉盛り高さ) を大きくしたい場合、堆積したいニッケル粉末の堆積層 80 の厚み D だけ溶接台 10 を Z 軸方向に下げた後、ニッケル粉末の堆積ユニット 30 を溶接台 10 上で掃引して移動させ、ニッケル粉末の堆積層 80 を形成した後、堆積ユニット 30 を元の位置に復帰させて戻し、上記と同様にして、NiAl 要素片 (反応生成部) 81 を生成させ、金属間化合物の第 2 の被覆層 85 を形成し、2 次元成形又は 3 次元成形 (3 次元造形) を行うことができる。このようなプロセスを必要回数くり返した後、利用されなかったニッケル粉末を周囲の回収部 83 で回収することができ、金属間化合物 NiAl で構成された被覆層 (又は肉盛り溶接 85) を形成できる。これら一連の操作は装置 1 の外部に設けた制御装置 (計算制御ユニット 70) により自動的に制御される。

さらに、前記被覆装置及び被覆方法を利用すると、基材の被覆 (又は肉盛り被覆) だけでなく、複数の基材を溶接 (肉盛り溶接など) することも可能である。図 5 は被覆装置と基材上に形成された被覆層 (肉盛り溶接部) との配置関係を示す概略図であり、図 6 は図 5 の溶接部を示す平面図である。

この例において、基材 90 は、第 1 の基材 91 と第 2 の基材 92 とで構成され、双方の基材 91、92 を溶接する合わせ目には隙間 95 を設定した状態を示している。なお、基材の厚さ等の状況に応じて、複数の基材間に隙間 95 は設けなくてもよい。

吐出ユニット 20 と堆積ユニット 30 とは、上記のように、相互に関連して X・Y 平面内を移動可能であり、吐出ユニット 20 に先行して移動する堆積ユニット 30 からはニッケル粉末 83 が基材 90 の合わせ目に沿って排出され、基材 91、92 間の合わせ目上にニッケル粉末の堆積層 94 が形成される。次いで、吐出ユニット 20 からの溶融アルミニウム液滴 3 がニッケル粉末の堆積層 94 の上に滴

下し、発熱を伴うNiAl反応生成部81を形成する。このような動作を繰り返
し、制御装置70の信号を受けて、ニッケル粉末の堆積層94に沿って、アルミ
ニウム液滴3を自在の位置で連続的又は間欠的に滴下することにより、金属間化
合物で構成され、かつ連続して積層された被覆層（連続した肉盛り溶接部93）
が形成される。図示しないが、同様の動作を繰り返すことにより、前記溶接部9
3の上に被覆層（第2の溶接部93（2））を重ねて形成し、溶接部93の肉盛
りを厚くすることが可能である。そのため、基材／溶接部間の強度を必要とする
場合などに容易に対処できる。なお、被覆層（又は肉盛り層）同士を上下方向に
接合して積層可能であることは、前記の通りである。

図4は本発明の被覆方法および被覆装置の他の例を示す概略図である。

堆積ユニット30から供給する材料は、ニッケル粉末31単独のみならず、反
応制御のためニッケル粉末に添加したアルミニウム粉末などの金属との混合物で
あってもよく、ニッケル等の金属に予めセラミックスの粉末35を混合した混合
物であってもよい。この場合は、セラミックスを充填材又は補強材とするフィラ
ー強化型の溶接部（複合溶接部）85を形成できる。

この例では、図4に示すように、ニッケル粉末を供給可能な第1の堆積ユニッ
ト30の他に、セラミックス粉末35を供給可能な第2の堆積ユニット36を設
け、セラミックス粉末35とニッケル粉末31とを、X軸及び／又はY軸方向に
沿って適当な比率で溶接台10の基材2上に供給し堆積層84を形成している。
このような方法では、セラミック分散又は強化型金属間化合物による被覆層又は
溶接部85を形成できる。また、複数回の堆積操作又は複数回の被覆層の積層操
作により、それぞれの粉末を厚み方向に傾斜配分化することにより、組成割合が
傾斜した溶接部85も形成できる。

また、反応生成物を堆積しながら溶接する方法において、溶接部85の寸法的
精度や材料的な緻密度を確保するため、1又は複数の被覆又は溶接ごとに、もし
くは不連続的に任意の溶接部の上面に対して、各種の処理（切削、研削、研磨、
酸洗などの処理）をするため、図示しない機構部を本装置内に内蔵させてもよい。

なお、装置の動作に関し、上述の例では、溶接台10をZ軸方向に移動可能と
し、吐出ユニット20をXY平面内の任意の位置に移動可能とし、堆積ユニット

30をX軸又はY軸方向に移動可能としたが、ニッケル粉末31をXY面内で傾斜配分させるため、もしくは、被覆部材や溶接部材の製作する時間を短縮するため、堆積ユニット30又は第4図で例示した別の堆積ユニット36も同時にXY平面内の任意の位置に移動可能としてもよい。さらに、溶接台10を固定とし、吐出ユニット20が、高さ方向Z軸方向とともにXY平面内の任意の位置に移動可能であり、堆積ユニット30が、XY平面内の任意の位置に移動可能であったり、若しくはX軸方向又はY軸方向のいずれか一方の方向の任意の位置に移動可能であるように構成してもよい。

さらには、立体的又は3次元的形状の基材（例えば、タービンブレードなど）を3次元的に被覆するため、堆積ユニット30と吐出ユニット20は、X軸方向及びY軸方向の少なくとも一方の方向に加えて、Z軸方向に移動可能であってもよい。なお、3次元的に被覆する場合、溶接部の被膜ビードの軌跡は、CADによる基材（例えば、ブレードなど）の3次元設計データ、3次元座標測定機を用いて測定された3次元座標データ、堆積ユニット（又は堆積部）の前方に取り付けた方位センサ又は位置センサから得られる座標データなどを利用して生成させてもよく、これらの座標データを組み合わせて生成させてもよい。

なお、前述の説明では、ニッケル粉末を基材上に堆積し、アルミニウム液滴を落下させるように構成しているが、堆積ユニット30に図示しない加熱装置を新たに設け、溶融したニッケル液滴を基材上に滴下して溶融ニッケルの層を形成した後、アルミニウム液滴をニッケル層に滴下し金属間化合物を生成することも可能である。この方法の場合は、融点の高いニッケルを溶融することになり、より大きなエネルギーを費やすことになる点で省エネルギー的效果が減殺されるが、より緻密なニッケル層を得られるので、被覆の内部に気孔を生じる懸念の少ない健全な被覆層（又は肉盛り溶接被覆層）を形成することが可能となる。

また、堆積ユニット30に図示しない加熱装置を新たに設け、溶融したニッケル液滴を基材上に滴下して溶融ニッケルの層を形成した後、アルミニウムを溶融せず粉末状態のまま溶融ニッケル層に吐出して金属間化合物を生成することも可能である。この方法では、前記吐出ユニット20と堆積ユニット30との配置を入れ換え、吐出ユニットにニッケル片又は粉末を充填し、堆積ユニットにアルミ

ニウム粉末を充填することになる。この方法の場合も、融点の高いニッケルを溶融することになり、より大きなエネルギーを費やすことになる点で省エネルギー的効果が減殺されるが、上述のニッケルおよびアルミニウムの双方を溶融するよりは消費するエネルギーが少ない。

さらに、金属粉末を供給するための堆積ユニット（堆積装置）やセラミックスを供給するための堆積ユニット（堆積装置）は、それぞれ単一のユニットで構成する必要はなく、複数のユニットで構成してもよい。また、吐出ユニット（吐出装置）も単一のユニットに限らず複数のユニットで構成できる。なお、1つの堆積ユニットと1つの吐出ユニットとで被覆ユニットを構成し、複数の被覆ユニットを、X軸方向及び／又はY軸方向に並設してもよい。

さらには、前記のように、本発明の方法および被覆装置を用いると、金属間化合物で構成された被覆層（又は肉盛り被覆層）の積層や、3次元的形状を有する基材表面での被覆層（又は肉盛り被覆層）の形成により、3次元的に造形することも可能である。

前記のように、金属間化合物による被膜の形成は、従来、拡散法、溶射法、燃焼合成法などにより行われているが、材質の有する特性から多くの工程とエネルギーを消費している。本発明の方法では異種金属間の発熱反応を利用して被覆層の合成と基材への接合を同時に行うので、一種の燃焼合成法といえるが、本発明による方法によれば、燃焼合成反応による材料自体の発熱反応を有効に利用するため、少ない消費エネルギーと短時間で施工できる利点があり、低コストの肉盛り溶接部材を提供できる。

本発明が、従来の燃焼合成法と著しく異なる点は、反応開始温度の制御が可能である点である。すなわち、従来の燃焼合成法では異種金属を混合して圧粉体として用いるので、異種金属がともに同じ温度に加熱される。それゆえ、一方の金属が溶融する温度が自動的に反応開始温度となってしまう。これに対し、本発明の方法では異種金属を別々に供給するので、両者の温度を独立して制御することにより反応開始温度を自由に制御することができる。反応開始温度が制御できることは反応による発熱温度を自由に制御することに等しく、これにより基材の溶融深さも制御可能となり、厚い被覆の場合はもちろん、薄い被覆の場合であっ

ても接合強度の向上が図れる。

また、従来の燃焼合成法では、粒子状又は繊維状セラミックなどを添加して反応生成物の機械的強度の向上を目指そうとしても、それらが反応熱を吸収するために反応促進が阻害されるという問題があり、強化粒子の添加量に限界があった。これに対し、本発明の方法では反応開始温度を一方の金属の融点を越える高い温度に設定することができるので、セラミック粒子による吸熱分を補償でき、添加量の増加に伴う合成反応完成度の低下を防ぐことができる。

また、金属間化合物の有する高強度、耐熱性、耐摩耗性などの優れた特性とも相俟って、短期間で高機能の部品を提供することができ、地球環境にも優しいプロセスを提供できる。例えば、環境汚染については、焼却炉の燃焼・排気系構造材に、本発明による耐高温金属間化合物による被覆溶接を応用すれば、焼却炉の耐熱性を高められることから、焼却温度を上昇させダイオキシン等の環境有害物質の放出を減らすことができる。また、金属間化合物の肉盛りに要する消費エネルギーが減少することにより、炭酸ガスなどの地球温暖化要因の発生を抑制でき環境劣化にも対応できる。従って、金属間化合物の被覆施工に関する課題を解決する手段と高機能溶接部材（又は被覆部材）を提供することにより、広範な産業分野の必要性に応えることができる。さらに、CAD/CAMシステムの利用により、基材表面上に自由形状の被覆を自動的に行えることも本発明の方法の重要な特徴である。

実施例

以下に、実施例に基づいて本発明をより詳細に説明するが、本発明はこれらの実施例によって限定されるものではない。

実施例

厚さ2mmのステンレス板上に約1.5gのNi粉末を盛り、この堆積物に約0.7gのAl融液を滴下させ、両者を反応させることにより金属間化合物NiAlの合成を試みた。また、NiAlの生成熱が 118 kJ/mol と大きいので、反応時の発熱によりステンレス板の表面が熔融し、NiAlと接合することを期待した。なお、Al融液の温度は 1000°C 、 1100°C 、 1200°C とし、Ni粉末およびステンレス板は予熱しなかった。反応後、試料断面を光学顕微鏡と

SEM (Scanning electron microscope) により微細組織の観察を行うとともに、EPMAにより接合界面と直交する断面での元素濃度分布を測定した。

Al 融液の温度が1100℃以上では、Ni 粉末とAl 融液とが完全に反応し、幅1.3mmおよび厚み2mmの被覆層全体に亘り金属間化合物NiAlが生成した。また、反応熱によりステンレス板の表面は融解し、金属間化合物NiAlとステンレス板とが接合した。なお、Al 融液の温度が1000℃では、Ni 粉末とAl 融液とが完全に反応せず、NiAlとともに他のAl-Ni系金属間化合物も生成したが、1200℃で2時間保持したところ、NiAl単相の金属間化合物が生成した。また、Ni 粉末とAl 融液の液滴を連続的に供給することにより、ステンレス板を線状に被覆できた。このような結果から、厚さ1~2mm程度の厚みの大きな被覆層を簡単な操作で形成できるとともに、基材表面の一部を選択的に被覆できる部分被覆法として有用であることが判明した。

本発明では、第1の物質の堆積と第2の物質の吐出という簡単な操作で、基材を金属間化合物で簡便かつ効率よく被覆できるとともに、複数の基材を溶接して接合できる。また、数百μmから数mm厚さを有する金属間化合物の被覆層を少ない消費エネルギーで短時間に形成できる。さらに、本発明では、異種金属をそれぞれ供給するため、反応開始温度を容易に制御でき、被覆層の厚みの如何にかかわらず、基材と被覆層との接合強度を向上できる。さらには、前工程（拡散法における蒸着、溶射法における前駆層の堆積工程、燃焼合成法における圧粉体作製など）が不要であるだけでなく、コンピュータで微細に制御できるCAD/CAEシステムの利用により、金属間化合物による基材表面の被覆を自在かつ自動的に行うことができる。また、比較的に小容量の熱源（高周波加熱機や抵抗加熱機など）が使用でき、エネルギー的に有利に金属間化合物の被覆層を形成できる。